

Eliminace samobuzených kmitů řezného procesu – návrh regulátoru

TEXT: Ing. Jan Vetiška, doc. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc., Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně

Tento příspěvek se zabývá možností potlačení samobuzených kmitů řezného procesu pomocí změny polohy nástroje a obráběné plochy. Návrh regulátoru polohy nástroje je postaven na modelu řezného procesu, který vychází z regenerativního principu. Při použití tohoto postupu v simulačním prostředí MATLAB Simulink bylo dosaženo trojnásobného snížení samobuzeného kmitání.

V současné době jsou firmy vystaveny rostoucímu tlaku na zvyšování produktivity práce a snižování nákladů na výrobu nových produktů. To vede výrobce obráběcích strojů k vývoji stále výkonnějších a produktivnějších strojů, které by produkovaly precizní výrobky s kvalitním povrchem v co nejkratším čase. I přes všechnu tuto snahu o dokonalejší stroj stále zůstává několik problémů, které tyto snahy komplikují.

Jedním z těchto problémů je samobuzené kmitání vznikající mezi nástrojem a obráběnou plochou. Toto kmitání se projevuje při hrubování i při dokončovacích pracích. Výsledkem je zhoršená geometrická přesnost výrobku, jakost obráběné plochy a hluk.

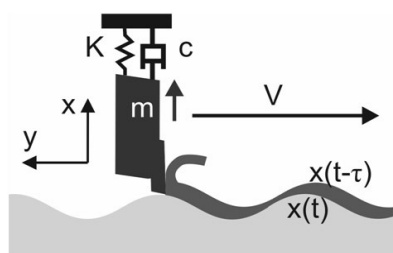
Existuje několik teorií, které se zabývají tímto jevem např. regenerativní princip nebo princip polohové vazby.

Tato práce vychází z regenerativního principu, na jehož základě je postaven model řezného procesu [1].

Regenerativní princip

Samobuzené kmitání vynikající v místě kontaktu nástroje a obráběné plochy bez vnějšího periodického buzení vzniká vzájemnou interakcí obrobku, nástroje a obráběcího stroje, proto je možné pro modelování použít systém s jedním stupněm volnosti obsahujícím hmotnost, pružinu a tlumič jak ukazuje obrázek 1.

Regenerační princip vychází z předpokladu, že obráběný povrch je zvlněný a tím dochází během řezání ke změně tloušťky třísky (změně řezné síly) jak ukazuje obrázek 1. [1, 8].



Obr. 1 Regenerativní princip samobuzeného kmitání [1]

Model řezného procesu

Model s jedním stupněm volnosti obsahující hmotnost m – pružinu k – tlumení c lze modelovat pomocí základní rovnice [2].

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_x(t) \quad (1)$$

kde řezná síla $F_x(t)$ je

$$F_x(t) = a \left\{ K_f \left[h_0 - x(t) + x(t-\tau) \right] - \frac{C_i \dot{x}(t)}{V} - \frac{\alpha_i \ddot{x}(t)}{V^2} \right\} \quad (2)$$

F_x , a , V , $x(t)$, $x(t-\tau)$, h_0 , K_f , C_i a α_i jsou postupně: řezná síla, šířka nástroje, řezná rychlost, časový průběh vnitřní vlny, časový průběh vnější vlny, posunutí nástroje a tři koeficienty řezné síly.

Dynamika procesu je dána následujícím vztahem

$$a_2 \ddot{x}(t) + a_1 \dot{x}(t) + a_0 x(t) + a_{0,\tau} x(t-\tau) = b_0 \quad (3)$$

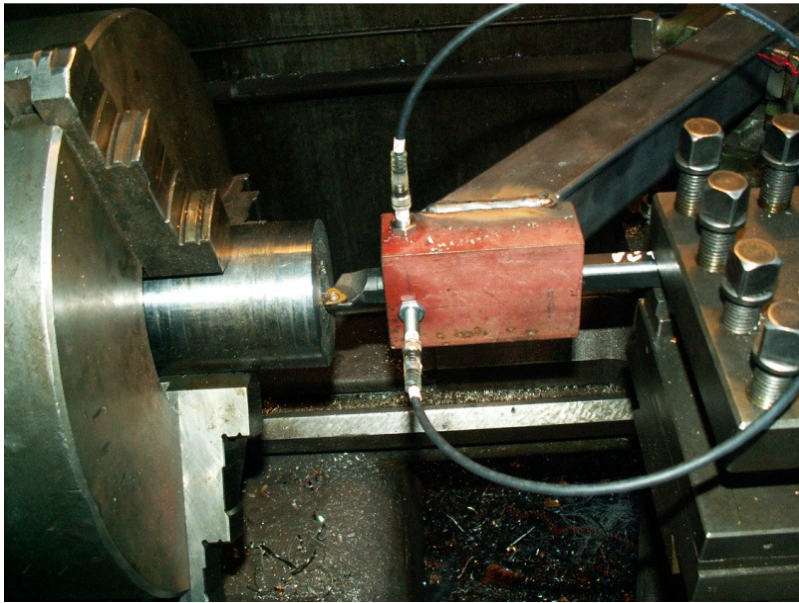
kde

$$a_2 = m + a \frac{\alpha_i}{V^2}, \quad a_1 = c + a \frac{C_i}{V}, \quad a_0 = k + aK_f, \\ a_{0,\tau} = aK_f, \quad b_0 = aK_f h_0 \quad (4)$$

Experimentální ověření

Pro ověření správné funkce matematického modelu bylo provedeno měření samobuzených kmitů generovaných při obrábění vnitřní válčové plochy ocelového polotovaru (11SMn30) na univerzálním soustruhu SV18 s držákem řezných plátek Pramet S20S-SWLCR 06 s řezným plátkem Pramet WCMT 06T308E-UM. Frekvence otáčení vřetene $N = 224 \text{ ot/min}$, posuv nástroje $h_0 = 0,175 \text{ mm/ot}$, hloubka řezu $0,8 \text{ mm}$. Během obrábění byly dvojicí na sebe kolmých snímačů měřeny průhyby řezného nástroje, které se ukládaly pomocí programovatelného automatu cRIO firmy National Instruments.

Naměřené průhyby řezného nástroje ve vodorovném směru slouží k určení parametrů matematického modelu k ověření správnosti jeho struktury a funkce. Z experimentu vplynuly následující parametry modelu: $V = 22,5 \text{ m/min}$, $m = 0,3 \text{ kg}$, $c = 145 \text{ Nm-1s-1}$,



Obr. 2 Pozice snímačů při experimentu [2]

$$F_{a,x}(t) = K_i \int_0^t [x_{ref}(\vartheta) - x(\vartheta)] d\vartheta + K_p x(t) + K_d \dot{x}(t) + K_{p,\tau} x(t - \tau) + K_0 \quad (6)$$

a dosazením rovnice 6 do rovnice 3

$$a_2 \ddot{x}(t) + a_1 \dot{x}(t) + a_0 x(t) + a_{0,\tau} x(t - \tau) = b_0 - F_{a,x}(t) \quad (7)$$

a porovnááním požadované dynamiky (rovnice 5) s rovnicí 7 a nakonec dosazením rovnice 4 do rovnice 7 získáme následující vztahy

$$K_d = c + a \frac{C_i}{V} + 3p \left(m + a \frac{\alpha_i}{V^2} \right),$$

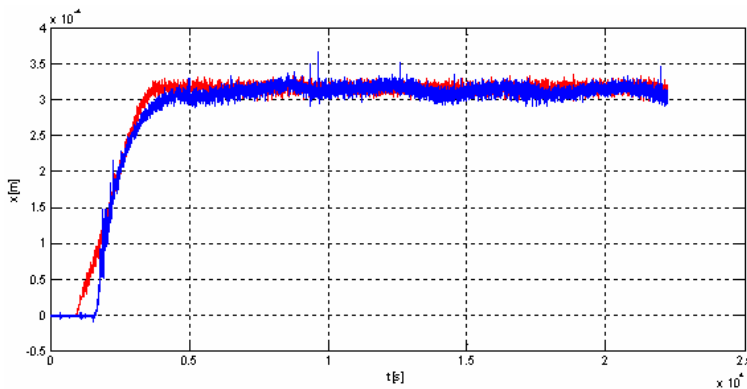
$$K_i = -p^3 \left(m + a \frac{\alpha_i}{V^2} \right),$$

$$K_i = -p^3 a_2,$$

$$K_{p,\tau} = aK_f, K_0 = aK_f h_0, \quad (8)$$

pro $V \neq 0$.

Analytické formy získků z rovnice 8 nám umožňují použít PID jako adaptivní regulátor, který je adaptabilní na změny řezné rychlosti V a změny velikosti posuvu nástroje na otáčku h_0 . Při nízké řezné rychlosti lze očekávat horší kvalitu regulace, protože se řezná rychlost vyskytuje ve jmenovatelích rovnice 8.



Obr.3. Srovnání modelovaného (červená) a skutečného (modrá) průběhu řezné síly

$k = 6.48 \times 10^6 \text{ Nm}^{-1}$, $K_f = 1384$, $C_i = 0.611 \times 10^6$, $\alpha_i = 332$, $a = 0.001 \text{ m}$ a $\tau = 0.01 \text{ s}$. Frekvence samobuzených kmitů byla 343 Hz a je závislá na vlastní frekvenci nástroje.

(pro trojnásobek vlastního čísla $p < 0$) navrhne PID regulátor, který řídí kompenzační sílu $F_{a,x}(t)$. Zisky regulátoru dostaneme při zákonu řízení

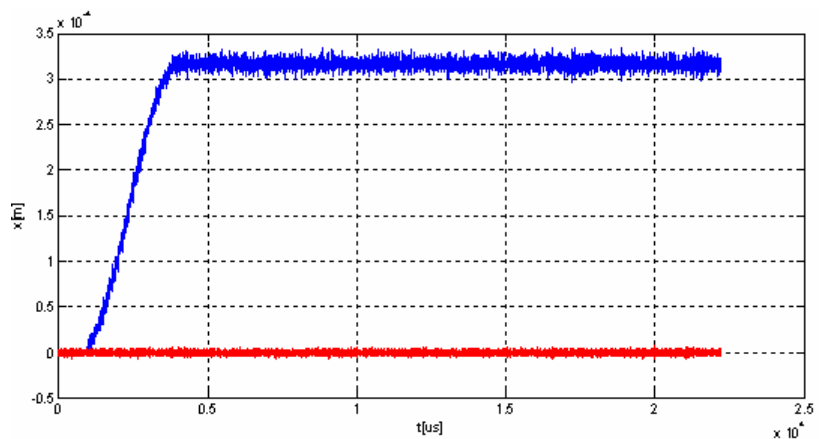
Návrh regulátoru

Pro eliminaci samobuzených kmitů bylo nutné vytvořit rychle reagující kompenzátor který působí proti nežádoucím kmitům. Regulátor je postavený na základě předchozího matematického modelu. Pro zachování dynamiky procesu na hranici aperiodicity, vychází regulátor ze známé dynamiky [3, 4]

$$\ddot{x}(t) - 3p\dot{x}(t) + 3p^2x(t) - p^3 \int_0^t x(\tau) d\tau = -p^3 \int_0^t x_{ref}(\tau) d\tau \quad (5)$$

Simulační ověření

Vzorkovací perioda byla zvolena s ohledem na možnosti plánovaného hardware, který má být použit pro realizaci kompenzátoru. Maximální rychlost byla stanovena požadováním



Obr.4. Pozice nástroje x s řízením (červená) a bez řízení (modrá)



trojnásobkem vlastního čísla p pro konečný proces. Pro $p = -600$ vykazuje proces dobrou dynamiku a stabilitu. Nad $p = -650$ se ukazují netlumené oscilace. Průběh polohy x nástroje ukazuje obr. 4.

Tento příspěvek představuje model řezné síly a návrh regulátoru pro ovládnutí kompenzační síly potřebné pro potlačení samobuzených kmitů při obrábění. Cílem práce bylo navrhnout adaptabilní regulátor s jednoduchou strukturou a ověření jeho použitelnosti. Použití navrženého kompenzátoru řezné síly vede k výraznému snížení samobuzeného kmitání ve srovnání s neřízeným procesem. Simulace celého procesu byla provedena modelováním obrábění s konstantní řeznou rychlostí V a konstantní posuvem nástroje h_0 . Dosažené snížení kmitání bylo přibližně čtyřnásobné. Další práce bude zaměřena na návrh pohonu na kompenzaci samobuzeného kmitání.

Literatura

1. T. BŘEZINA, Tomáš – VETIŠKA, Jan – BLECHA, Petr – HOUŠKA, Pavel: Design of the controller for elimination of self-excited oscillations, Recent advances in MECHATRONICS, Springer, 395-400, ISBN 978-642-05021-3, 2009
2. ALTINTAS, Y – EYNIAN, M – ONOZUKA, H: Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping, Annals of the CIRP, Volume 57/1, p. 371-374, ISSN 0007-8506, 2008.
3. KAUTSKY, J – NICHOLS, N, K: Robust Pole Assignment in Linear State Feedback, Int. J. Control, 41 (1985), pp. 1129-1155
4. LAUB, A, J – WETTE, M: Algorithms and Software for Pole Assignment and Observers, UCRL-15646 Rev.1, EE Dept., Univ. of Calif., Santa Barbara, CA, Sept. 1984
5. Marek, J: Design of CNC machine tools, MM Industrial spectrum, Sept. 2006, 282 p., ISSN 1212-2572, in Czech.

6. RIVIÈRE, E – FILIPPI, E – DEHOMBREUX, P: Forces, vibrations and roughness prediction in milling using dynamic simulation, Fifth international conference on high speed machining 2006, ENSAM, Metz
7. TLUSTY, Jiří: Analysis of the State of Research in Cutting Dynamic, 1978, Annals of the CIRP 27:583-589
8. Tlustý, J – Polacek, M: The Stability of Machine Tools Against Self Excited Vibrations in Machining, Int. Res. in Prod. Eng., ASME, 1963, p. 465-474

This paper deals with the possibility of suppressing self-excited oscillations cutting process by repositioning the tools and machined surfaces. Position controller design tool is built on the model of cutting process based on the regenerative principle. Applying this procedure in MATLAB Simulink simulation was achieved triple self-excited oscillations reduce.

RESUME